

☐ Protecteur individuel contre le bruit
☐ Affaiblissement acoustique

AFFAIBLISSEMENT ACOUSTIQUE IN SITU DES PROTECTEURS INDIVIDUELS CONTRE LE BRUIT- ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

► *Alain KUSY,*
INRS, département Ingénierie des équipements de travail

La réglementation européenne relative à la protection des travailleurs exposés au bruit a été modifiée par la directive 2003/10/CE. Elle introduit en particulier une nouvelle obligation sous la forme de valeurs limites d'exposition : le niveau d'exposition quotidienne au bruit est limité à 87 dB(A) et le niveau de pression acoustique de crête est limité à 140 dB(C), protecteurs auditifs inclus.
La détermination de ce niveau d'exposition nécessite, d'une part, la connaissance de la composition fréquentielle de la pression acoustique du bruit d'exposition et, d'autre part, celle des valeurs d'affaiblissement acoustique des protecteurs individuels contre le bruit (PICB) telles qu'elles peuvent être estimées sur le terrain. Ces contraintes conduisent à des difficultés d'ordre métrologique et méthodologique.
L'objectif de la présente étude bibliographique est d'établir un état des connaissances actuelles sur la capacité réelle des PICB à affaiblir les bruits. Les méthodes d'essais pour la détermination de l'affaiblissement acoustique des protecteurs – en laboratoire et/ou *in situ* – sont décrites ainsi que les caractéristiques des sites, des bancs et des sujets d'essai. Une typologie des études a été établie en fonction de leur contenu (origine, nature, objectif) et de leur finalité.
La revue des documents étudiés met en évidence une recherche permanente des préventeurs afin d'établir des indicateurs fiables pour prédire la réelle efficacité des protecteurs *in situ*. En Amérique du nord, cette recherche a induit d'importantes modifications de la normalisation relative à la détermination des performances des protecteurs. Ces modifications ont été adoptées par l'ISO dans la norme ISO/TS 4869-5 en 2006.
Les résultats de la présente étude indiquent un écart important entre les valeurs d'affaiblissement acoustique affichées sur les notices des protecteurs par les fabricants et les affaiblissements réels tels qu'ils ont été estimés *in situ*. De plus, cet écart est variable selon le type de protecteur, allant de 5 dB pour des protecteurs de type coquilles montées sur casque de sécurité industriel à près de 22 dB pour des bouchons d'oreille en mousse à former.
Les données relatives aux bouchons moulés individualisés sont peu abondantes. Il serait donc souhaitable de mener des investigations complémentaires dans ce domaine.

Dans l'industrie, les effets nocifs du bruit sur l'audition entraînent fréquemment des surdités chez les salariés les plus exposés. La surdité professionnelle est la quatrième maladie professionnelle reconnue (1 126 cas au titre du tableau 42 en 2006). Les responsables d'entreprise et les chargés de prévention ont la possibilité de recourir en dernier lieu à l'utilisation de protecteurs individuels contre le bruit (PICB) comme moyen de prévention dans l'attente de solutions collectives de mise en œuvre moins immédiate.

La réglementation européenne relative à la protection des travailleurs exposés au bruit a été modifiée par la directive 2003/10/CE [1]. Cette directive modifie les seuils d'action réglementaires liés au bruit (*Cf. Tableau I*) et introduit des valeurs limites d'exposition (VLE). Pour l'application de ces VLE,

IN-SITU ATTENUATION OF HEARING PROTECTION DEVICES - A BIBLIOGRAPHICAL STUDY

Directive 2003/10/CE has modified European regulations on protecting workers against noise exposure. This directive specifically introduces a new obligation in the form of exposure limit values: the level of daily noise exposure being henceforth limited to 87 dB (A) and peak sound pressure level to 140 dB (C), including attenuation of hearing protectors.
Exposure level determination requires knowing both the sound pressure spectrum for the exposure noise and the noise attenuation values of hearing protection devices (HPD) based on their field estimation. These constraints lead to difficulties of both metrological and methodological nature.
The aim of this bibliographic survey was to establish a current state of the art in relation to the real capacity of HPD to attenuate noises. Testing methods applied to determining HPD noise attenuation - laboratory and/or in-situ measurements - are described, along with the site, test bench and subject characteristics. Typology was established based on study content (origin, nature, aim) and end-purpose.
Reviewing the documents studied reveals a constant concern of researchers in establishing reliable indicators for predicting the real efficiency of HPD in situ. In North America, research has led to major changes in standardization for determining HPD performance characteristics. The ISO integrated these changes into standard ISO/TS 4869-5 in 2006.
Our study findings reveal a major difference between attenuation values declared in HPD manufacturers' specifications and real attenuation values measured in situ. Moreover, this difference varies, depending on the HPD type: ranging from 5 dB for safety helmet-mounted ear-muff types to nearly 22 dB for formable foam ear-plug types.
There are too few data on custom-moulded ear-plug type and additional investigations are required in this area.

☐ Personal hearing protector
☐ Acoustic attenuation

TABLEAU I

Paramètres physiques correspondant aux seuils d'action réglementaires
Physical parameters for regulatory action thresholds

Symbole normalisé	Appellation	Définition
$L_{EX,d}$	Niveau d'exposition quotidienne au bruit	Moyenne pondérée dans le temps des niveaux d'exposition au bruit pour une journée de travail de 8 heures exprimée en dB(A). La courbe de pondération A rend compte de la sensibilité de l'oreille humaine et permet d'apprécier la gêne engendrée par le bruit.
L_{pc}	Niveau de pression acoustique de crête	Niveau de la valeur maximale de pression acoustique instantanée pondérée C. La courbe de pondération C correspond au comportement de l'oreille soumise à des niveaux sonores élevés (supérieurs à 85 dB)

TABLEAU II

Seuils d'action et valeurs limites d'exposition définies par la directive 2003/10/CE
Action thresholds and exposure limit values defined by European Directive 2003/10/CE

Définition des seuils [Article 3 de la directive 2003/10/CE]	Valeur	
	$L_{EX,d}$	L_{pc}
Valeurs d'exposition inférieures déclenchant certaines actions réglementaires de prévention	80 dB(A)	135 dB(C)
Valeurs d'exposition supérieures déclenchant d'autres actions réglementaires de prévention	85 dB(A)	137 dB(C)
Valeurs limites d'exposition, protecteur inclus	87 dB(A)	140 dB(C)

la détermination de l'exposition effective des travailleurs au bruit doit tenir compte de l'affaiblissement acoustique apporté par les PICB.

Lorsqu'il existe des risques d'exposition au bruit au-delà des limites fixées par la réglementation (*cf. Tableau II*), les principes de protection des travailleurs s'appuient en priorité sur la prévention intégrée (réduction du bruit à la source) puis sur la prévention collective (réduction de la propagation du bruit). La protection collective, par son caractère permanent, est prioritaire dans la lutte contre le bruit. Elle permet une communication aisée et autorise la perception des signaux de danger. La protection individuelle ne doit être envisagée qu'en dernier lieu.

L'estimation du niveau d'exposition résiduel sous un protecteur peut être obtenue par l'application de trois méthodes décrites dans la norme NF EN ISO 4869-2 [2]. L'obligation du respect de valeurs limites d'exposition, protecteur inclus, est une innovation réglementaire. Elle induit pour le préventeur de terrain des problèmes à la fois métrologiques et méthodologiques et pose la question de leur application pratique.

Les difficultés qui en résultent sont de trois types :

- difficultés méthodologiques d'estimation du niveau d'exposition résiduel au bruit. Selon la méthode utilisée et le spectre du bruit d'exposition, l'estimation du niveau résiduel sous le protecteur peut varier de 3 à 10 dB [3] ;
- difficultés métrologiques liées aux pondérations du bruit. Le mesurage normalisé de l'exposition au bruit doit être effectué et exprimé simultanément en dB(A) et en dB(C) ; ce qui implique l'utilisation d'un matériel coûteux et donc d'un accès peu aisé pour les petites et moyennes entreprises. De plus, ces difficultés métrologiques mènent à différents problèmes pratiques évoqués dans une note technique [4] ;
- différence entre niveaux prédits et niveaux réels. De nombreuses études menées dans divers pays au cours des trois dernières décennies ont montré des écarts importants selon que l'affaiblissement est obtenu en laboratoire ou évalué auprès de travailleurs sur le terrain.

Découlant directement de cette différence, il existe un risque réel de sous-protection des salariés exposés lors de l'application de la directive 2003/10/CE.

La classification des protecteurs pour cette étude se résume au *Tableau III*.

La présente étude bibliographique propose un inventaire des publications internationales relatives aux écarts, pour chaque type de protecteurs, entre les données de laboratoire et les données in situ. Cet inventaire se veut exhaustif sur une période allant de 1975 à 2005.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les matériels utilisés dans cette étude sont constitués de documents qui traitent de la différence entre les valeurs d'affaiblissement obtenues en laboratoire - et affichées par les fabricants - et les valeurs d'affaiblissement qu'obtiennent les utilisateurs sur le terrain. Alors que la directive est européenne, plus des trois quarts des documents analysés proviennent de pays non européens.

Toutes les études retenues dans cette revue présentent un objectif double :

- évaluer l'écart entre les valeurs d'affaiblissement acoustique obtenues à l'aide de mesures effectuées en laboratoire (VAL) et les valeurs d'affaiblis-



TABLEAU III

Classification sommaire des protecteurs individuels contre le bruit
Basic classification for hearing protection devices

PICB à coques	Circum aural	Serre-tête, serre-nuque	
		Coquilles montées sur casque	
Bouchon d'oreille	Intra aural	Prémoulé, préformé	
		À façonner par l'utilisateur	Mousse
			Fibre
		Moulé individualisé	
	Supra aural	Avec arceau	

sement acoustique réelles telles qu'elles peuvent être estimées *in situ* (VAS),

- comprendre et expliquer les raisons de cet écart.

Les VAL disponibles sont celles qui figurent dans les notices d'utilisation fournies par les fabricants avec les protecteurs -obligation imposée par la réglementation européenne- . Elles sont obtenues en laboratoire au moyen d'une méthode normalisée et constituent les valeurs maximales d'affaiblissement acoustique pouvant être obtenues avec ces protecteurs. Cependant, l'exposition des salariés doit être déterminée avec les VAS, c'est-à-dire tels qu'ils peuvent être estimés *in situ*.

Méthodes d'essai

L'affaiblissement acoustique des PICB peut être obtenu par des méthodes subjectives ou objectives. Les méthodes subjectives font appel à la perception subjective du bruit par l'oreille humaine. Les méthodes objectives mettent en œuvre des appareillages de mesures sur des dispositifs d'essai, des mannequins ou des sujets humains passifs. Des normes viennent à l'appui de ces méthodes.

Méthodes objectives

- La norme NF EN ISO 11904-2 [5] décrit la méthode de mesure sur mannequin tandis que la norme NF EN ISO 11904-1 [6] définit les mesures sur les sujets humains passifs. Ces méthodes sont essentiellement dédiées à des expérimentations de laboratoire. Cependant, des versions dérivées ont été mises en œuvre sur le terrain.

- Les mesures de dosimétrie (ou exposimétrie) au poste de travail permettent d'estimer la dose de bruit reçue par une personne exposée sur une durée de plusieurs heures et d'établir ainsi un niveau d'exposition quotidienne. Elles consistent à faire des mesures de niveaux au plus près de l'oreille des personnes exposées aux nuisances sonores. Plusieurs études décrivent l'utilisation de cette méthode [7, 8] qui permet :

  - de prendre en compte les variations d'amplitude des bruits même là où ils peuvent aléatoirement présenter un caractère impulsionnel [9] ;
  - de déterminer l'exposition journalière de salariés exposés à des postes mobiles.

Les dimensions des microphones de dosimètres permettent de mesurer le niveau de bruit sous le protecteur, notamment dans le cas des protecteurs à coquilles. Ainsi, en utilisant simultanément deux dosimètres, il est possible d'estimer la dose de bruit reçue à l'extérieur et sous le protecteur. Le résultat final est global et exprimé sous la forme d'un niveau équivalent en fonction de la durée de la mesure. La différence entre les niveaux équivalents, mesurés sur et sous le protecteur, donne la performance d'affaiblissement du PICB sur la période

de mesure. Cette méthode s'applique parfaitement à des mesures *in situ*. Le matériel est léger et peu encombrant pour le sujet d'essai qui peut donc effectuer sa tâche pendant les mesures avec un minimum de gêne. Cette méthode objective n'a été utilisée que dans le cas des PICB à coquilles.

Méthodes subjectives

▣ La méthode d'audiométrie liminaire consiste à faire des mesures audiométriques de comparaison. L'audiométrie liminaire à sons purs décrite dans la norme NF ISO 8253-1 [10] permet de déterminer de manière reproductible les seuils d'audition de patients sains ou atteints de surdité. Le seuil d'audition est, pour une fréquence donnée, le niveau minimal de bruit perçu par l'oreille du patient. Les bruits utilisés sont des fréquences pures. Cette méthode peut être utilisée sur le terrain au plus près des salariés (au service médical de l'entreprise) pour établir de manière approchée l'affaiblissement acoustique des PICB.

▣ La méthode liée à l'observation de la fatigue auditive temporaire (TTS : Temporary Threhold Shift) mise en œuvre par Royster [11, 12] est purement audiométrique. Le contrôle, à intervalles courts et répétés, de l'audition des personnes exposées permet, avec une relative précision, d'évaluer l'efficacité due au mode et à la durée de port des protecteurs. Le caractère stable de l'audition peut être interprété comme le signe d'un port correct et continu du protecteur. Les audiogrammes sont tous enregistrés oreilles nues (non occluses) évitant ainsi les dérives dues à la mise en place du protecteur.

▣ La méthode de base la plus communément usitée est dénommée Real Ear at Threshold (REAT, pour oreille réelle au seuil d'audition). Elle est décrite dans la norme ISO 4869-1 [13]. Elle permet, à l'aide d'une série d'audiogrammes effectués par des sujets d'essai, d'établir la performance d'affaiblissement du PICB par différence entre les seuils d'audition enregistrés avec et sans protecteur. Les bruits utilisés sont des bruits de bandes de fréquences d'une octave ou d'un tiers d'octave. Depuis 1957, cette méthode a été déclinée en normes à travers le monde dont quatre versions américaines [14 - 17] et une australienne [18].

Lieux d'expérimentation

L'évaluation de l'efficacité des PICB *in situ* nécessite de s'approcher au plus près des lieux d'exposition sonore des travailleurs ; soit pour y faire directement les mesures sur des salariés à leur poste de travail, équipés du protecteur qu'ils portent quotidiennement [7, 19] ; soit pour réduire la distance et donc le délai de route entre le poste de travail et le lieu de mesure [20 - 23]. Les chercheurs choisissent des sites où il existe des postes de travail bruyants en nombre et présentant des spectres de bruit d'exposition variés. Les chantiers de construction métallique [24], les ateliers de métallurgie [25], de rivetage, de grignotage, d'estampage, de forgeage, de maintenance ou de réglage de moteurs d'avion, sont des champs d'investigation adaptés. Il n'est pas rare d'y rencontrer des niveaux d'exposition sonore de l'ordre de 100 dB(A) et plus.

Sites d'essai

Le site d'essai est le local où se déroulent les différents tests destinés à déterminer l'efficacité des protecteurs. Pour les essais de laboratoire [26 - 30], le site est généralement construit en dur avec des caractéristiques d'isolation vis-à-vis des bruits extérieurs très strictes définies par les normes. Ces cabines présentent des volumes relativement restreints mais suffisants pour y créer un champ acoustique homogène et reproductible. Dans le laboratoire, il est possible de simuler des tâches et d'obtenir un pseudo poste de travail pour se rapprocher des conditions industrielles.

Pour les essais *in situ*, le poste de travail constitue un environnement parfaitement représentatif de l'exposition au bruit des salariés. Le poste de travail est utilisé comme site d'essai pour effectuer des mesures de dosimétrie simultanées [8]. Le champ acoustique n'est pas homogène et les niveaux de bruit sont instables. Cependant, les niveaux en-dessous et au-dehors du protecteur sont enregistrés simultanément, leur différence indique donc la performance du protecteur par rapport au bruit ambiant.

Lorsque les entreprises, où sont menées les études, disposent de cabines audiométriques destinées à la surveillance médicale du personnel, la méthode REAT y est mise en œuvre. Le champ acoustique est généré, soit par des enceintes placées en paroi de la cabine [31], soit à l'aide d'un casque audiométrique modifié pour créer le champ acoustique au plus près de l'oreille sous des coquilles à grand volume [32, 33].

Dans certains cas, la cabine est construite spécialement pour l'étude, au plus près des postes de travail d'où seront issus les sujets d'essai pour effectuer les audiogrammes nécessaires. Cependant, ces cellules en structures légères présentent des caractéristiques d'isolement insuffisantes [20, 32].

Enfin, pour des études visant à réunir un grand nombre de données, il est nécessaire d'effectuer des mesures dans divers sites d'expérimentation. Pour éviter la construction répétée des cellules décrites ci-dessus, les mesures sont effectuées dans une cabine audiométrique mobile, mieux isolée et intégrée dans un véhicule permettant de la déplacer d'une usine à une autre en conservant à l'identique les conditions relatives au site d'essai [22, 23, 34].

Sujets d'essai

L'intérêt des essais normalisés effectués en laboratoire est d'obtenir une grande reproductibilité dans la détermination des affaiblissements acoustiques des PICB ce qui permet la comparaison des PICB entre eux. Pour ce faire, toutes les conditions dans lesquelles se déroulent les essais doivent être identiques. Les sujets participant à ces essais normalisés sont préalablement entraînés aux méthodes d'audiométrie afin d'assurer la répétabilité de leur réponse aux stimuli acoustiques.

Selon le site d'expérimentation, les travailleurs peuvent être familiarisés ou non avec les tests audiométriques. Tantôt il existe dans l'entreprise un programme de préservation de l'audition des employés [35], tantôt l'audition de ces derniers est l'objet d'une surveillance aléatoire et les salariés ne connaissent pas ces tests [36]. Cet état de fait a une influence non négligeable sur la précision et donc la validité de ces tests. D'autres études, menées en laboratoire, ont permis de le vérifier par la comparaison des résultats de tests menés, soit avec des sujets entraînés, soit avec des sujets naïfs [37].



Les sujets d'essai en laboratoire et les travailleurs participant à des tests mettant en œuvre des méthodes objectives sont considérés comme des sujets passifs.

CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DES ÉTUDES

La plupart des documents étudiés peuvent être classés dans deux catégories. La première, la plus importante en nombre, est constituée de comptes rendus de mesures en laboratoire ou *in situ* dont le but est d'établir les performances des PICB dans diverses situations. La méthode de mesure peut-être subjective (REAT et similaires) ou objective (dosimétrie, utilisation de mannequin). Le caractère subjectif est lié à des mesures effectuées à l'aide de sujets d'essai, entraînés ou naïfs, mais conscients du but des mesures ; c'est-à-dire participants aux tests sous contrôle des expérimentateurs pour éviter ou pour détecter d'éventuels biais, volontaires ou non. Les mesures objectives sont conduites avec des sujets d'essai passifs ou des mannequins [38]. Certaines études donnent lieu à des simulations de situation de travail et d'exécution de tâches industrielles.

La deuxième catégorie contient les études à finalité normative. Les études menées avant le début des années 90 convergent toutes vers la même conclusion : l'affaiblissement acoustique des PICB indiqué par les notices des fabricants est largement surestimé par rapport aux valeurs estimées *in situ* et cette surestimation varie en fonction du type de protecteurs. Par conséquent, les normes décrivant les méthodes de mesure de cet affaiblissement acoustique doivent être révisées. Pour ce faire, il faut mener des études pour tester d'autres méthodes et pour les valider avant de les normaliser [39].

Aux États-Unis, le groupe de travail WG11 du comité accrédité de normalisation S12 a engagé, dès 1990, une recherche [40] avec deux objectifs. D'une part, mettre au point une méthode psychoacoustique (qu'on appellera plus tard la méthode B) en modifiant la sélection des sujets, leur entraînement, leur contrôle, la mise en place du protecteur, le nombre d'essais et le nombre de sujets d'essai [41] utilisés pour tenter de modéliser les conditions de terrain. Et, d'autre part, dans l'attente de la nouvelle méthode, concevoir un abattement applicable aux valeurs d'affaiblissement connues mesurées en laboratoire.

Les documents qui n'entrent pas dans les deux catégories sont soit des comparaisons inter laboratoires [42], soit des compilations de mesures normalisées, sorte de catalogues d'atténuations acoustiques de PICB [26, 30, 43], soit des réflexions sur l'effective pertinence d'indices d'affaiblissement [44, 45, 46], soit encore des comptes rendus d'études ciblées sur des points un peu particuliers [47 - 53].

Les *Tableaux en Annexe 1* présentent de manière chronologique tous les documents objets de la présente revue bibliographique.

RÉSULTATS

Les résultats présentés ici ne tiennent compte que de documents étudiés faisant état de données réellement exploitables. Ainsi, les données relatives à une seule fréquence ou à une partie trop étroite du spectre n'ont pas été prises en compte. De même, ont été exclus les résultats d'études trop anciennes dont les protecteurs testés n'existent plus et qui ne permettent pas la comparaison avec des protecteurs actuels. Le critère de sélection est fondé sur la possibilité qu'offrent les documents retenus d'établir des données simples sous la forme d'indices globaux d'affaiblissement tels que le SNR ou le NRR. En réalité, la valeur globale d'affaiblissement reflète un niveau de protection différent selon qu'elle est américaine (NRR) ou européenne, (SNR).

Créé en 1979 par l'EPA (Environmental Protection Agency, USA), le NRR (Noise Reduction Rating), indice global d'affaiblissement américain est le résultat d'un calcul fondé sur la base d'une méthode dite « méthode longue » utilisant des spectres de bruits d'exposition et des spectres d'atténuation définis par bandes d'octave, méthode normalisée à l'ISO en 1975. La base de cette méthode est également utilisée par les européens pour calculer le SNR (Single Number Rating). Les différences entre les deux indices sont définies en *Annexe 2*. Il est cependant possible de comparer les écarts entre VAL et VAS, que celles-ci soient exprimées en NRR ou en SNR. Des exemples d'applications numériques sont détaillés dans cette Annexe.

VALEURS DES ÉCARTS

Le *Tableau IV* constitue la synthèse des écarts moyens entre les valeurs d'affaiblissement acoustique affichées par les fabricants (VAL) et les valeurs moyennes issues des mesures in situ et pseudo-in situ (VAS).

Les écarts indiqués dans le *Tableau IVa* sont exprimés en valeur de SNR (européenne) et recouvrent les données issues de six études. Ceux du *Tableau IVb* le sont en valeur de NRR (américaine) et sont issus de données provenant de 21 études. Les données du *Tableau IVa* sont comprises dans celles du *Tableau IVb*. Il est avéré que les performances des PICB mesurées en laboratoire sont supérieures à celles qui sont estimées *in situ*. Le tableau montre que les écarts moyens, par type de PICB, varient de 5 à 21 dB. Il existe une bonne correspondance entre les valeurs des deux *Tableaux IVa* et *IVb*, qu'elles soient exprimées en valeur de SNR ou en valeur de NRR.

La présence, dans une part des publications étudiées, de données initiales exprimées par bandes d'octave a permis d'établir le SNR de données exprimées en NRR et inversement, de calculer le NRR de données exprimées en terme de SNR. Ces données sont détaillées dans les tableaux de l'*Annexe 3*.

CAUSES DES ÉCARTS

Les écarts constatés résultent de facteurs relatifs au protecteur, au porteur, à l'environnement, au temps, principalement :

- la mise en place du protecteur : bon nombre des salariés reçoivent leur protecteur sans qu'on leur apprenne à le mettre en place efficacement. Les sujets d'essai bénéficient, quant à eux, de séances d'entraînement et l'assistance d'un expérimentateur ;
- la tâche à accomplir : des mouvements répétés du corps, du buste et/ou

TABLEAU IVa

Écarts constatés sur l'indice SNR, entre valeurs d'affaiblissement acoustique affichées (VAL) et estimées in situ (VAS), par type de PICB, selon les données bibliographiques analysées

SNR differences observed between manufacturers' declared attenuation values (VAL) and those measured in situ (VAS), according to HPD type and analysed bibliographical data

Type de protecteur		Étendue des écarts constatés entre VAL et VAS, sur l'indice SNR en dB			
		Écart minimum	Écart moyen	Écart maximum	Nombre de sujets (nombre d'études)
Bouchon à former par l'utilisateur	en fibre	6,8	**14,9**	21,0	185 (4)
	en mousse	16,6	**21,8**	26,1	239 (3)
Bouchon préformé ou prémoulé		3,9	**19,2**	26,2	225 (3)
Semi-aural		-		-	
Bouchon moulé individualisé	avec évent	-	**13,5**	-	56 (1)
	sans évent	-	**6,6**	-	56 (1)
Serre-tête, serre-nuque		2,0	**11,5**	19,6	175 (4)
Coquille montée sur casque		2,3	**5,0**	7,6	57 (1)

TABLEAU IVb

Écarts constatés sur l'indice NRR, entre valeurs d'affaiblissement acoustique affichées (VAL) et estimées in situ (VAS), par type de PICB, selon les données bibliographiques analysées

NRR differences observed between manufacturers' declared attenuation values (VAL) and those measured in situ (VAS) according to HPD type and analysed bibliographical data

Type de protecteur		Étendue des écarts constatés entre VAL et VAS, sur l'indice NNR en dB			
		Écart minimum	Écart moyen	Écart maximum	Nombre de sujets (nombre d'études)
Bouchon à former par l'utilisateur	en fibre	12	**15,7**	25	360 (11)
	en mousse	6	**15,6**	24	633 (15)
Bouchon préformé ou prémoulé		4	**20,1**	28	550 (15)
Semi-aural		7	**8,7**	13	42 (2)
Bouchon moulé individualisé	avec ou sans évent	3	**11,6**	20	447 (6)
Serre-tête, serre-nuque		1	**8,4**	21	670 (20)
Coquille montée sur casque			**9,6**		177 (5)

de la tête, nécessaires au travail à effectuer, provoquent un déplacement du protecteur. Les sujets d'essai reçoivent pour consigne de ne pas bouger pendant les essais ;

- la composition fréquentielle et la nature des bruits d'exposition *in situ* pourraient être une raison des écarts constatés ;
- les conditions de travail : les postes de travail où la température est élevée provoquent aisément la transpiration. Les émissions de sueur sous les coussinets d'un serre-tête en diminuent l'étanchéité alors que les essais en laboratoire ne provoquent pas la transpiration des sujets ;
- le porteur : la barbe ou le port de lunettes sont des éléments générateurs de fuites pour les PICB à coquilles, d'autres EPI utilisés simultanément causent des effets similaires. Ces accessoires sont évités lors des essais de laboratoire ;
- la configuration du conduit auditif associée au port de bouchons d'oreille peut créer des différences interindividuelles par une mise en place très variable du protecteur ;
- le vieillissement des protecteurs est aussi un facteur de perte d'efficacité, notamment pour les PICB à coquilles. Selon une étude menée au BGIA [22], l'écart d'affaiblissement entre un PICB neuf et un PICB usagé, âgé de 2 à 3 ans peut aller jusqu'à 8 dB en fonction de la fréquence considérée. Élément essentiel à une bonne étanchéité des coquilles, la variation de la force de l'arceau pour des serre-tête peut diminuer de 10 % sur une même période d'utilisation. Tous les essais de laboratoire sont effectués avec des échantillons neufs.

L'efficacité réelle des PICB est modifiée par d'autres facteurs tels que le confort, le design ou la nécessité de communiquer. Ces paramètres sont plus subjectifs que ceux listés ci-dessus. La mesure de leur influence est de ce fait malaisée à établir. Cependant, de nombreux auteurs, dont Berger [54], en font état. Il est difficile, voire impossible, d'estimer avec précision la perte d'efficacité due à ces facteurs.

Les *Tableaux IV* font apparaître des écarts labo/*in situ* plus importants pour des protecteurs du type bouchon « à former par l'utilisateur » ou « prémoulé »



que pour des protecteurs du type serre-tête ou bouchon moulé individualisé en raison des différences de mise en place. Le bouchon moulé individualisé est, par principe, adapté à l'anatomie de son porteur, ce qui le rend très confortable. Une mise en place incorrecte est aisément détectable par le porteur qui perçoit immédiatement une gêne. Les protecteurs à coquilles ne présentent pas non plus de difficulté particulière de mise en place lorsque le serre-tête est correctement réglé aux dimensions du porteur. Celui-ci doit juste s'assurer que le pavillon est entièrement contenu dans la coquille. Cependant, en cas de port de lunettes à branches, de barbe ou de cheveux longs, un défaut d'étanchéité peut diminuer l'affaiblissement acoustique apporté par les coquilles.

En revanche, la mise en place des bouchons « à former par l'utilisateur » ou « prémoulé » nécessite un minimum de formation, à défaut l'efficacité maximale du bouchon ne peut être obtenue. Les coquilles montées sur casque présentent une difficulté de mise en place due au mode de fixation et aux possibilités réduites de réglage de l'arceau équivalent. Ce type de protecteur est plus sujet aux fuites que les serre-tête ou les serre-nuque.

La plus grande partie des données recueillies concerne les serre-tête et les bouchons « à former par l'utilisateur » ou « prémoulés » car ce sont ceux qui posent le plus de questions. En revanche, les données relatives à la réelle efficacité *in situ* des coquilles montées sur casque et des bouchons moulés individualisés sont peu nombreuses.

DISCUSSION

L'analyse des documents a permis d'établir des valeurs moyennes de l'écart entre VAL et VAS pour chaque type de PICB. Elle a mis en évidence l'évolution des critères de caractérisation des protecteurs à l'aide de différents indices d'affaiblissement acoustique.

La diversité des données

Les limitations indiquées par différents auteurs sur leurs résultats sont le plus souvent liées à des problèmes d'ordre technique tels que l'isolation acoustique des cabines d'essai et le bruit de fond trop élevé induisant une variabilité intra et inter individuelle lors de la détermination des seuils d'audition, notamment dans les basses fréquences.

Étant donné la diversité des méthodes utilisées et pour éviter les dérives dues aux calculs, seules les études présentant des résultats d'affaiblissement acoustique par bandes d'octave ont été sélectionnées ; exception faite d'une étude mettant en œuvre une méthode objective dont les résultats sont exprimés en niveau global du spectre.

Les données brutes constituées de l'affaiblissement acoustique moyen pour un panel de sujets avec l'écart type associé sont présentées :

- soit par bandes de fréquences ; les valeurs fréquentielles (de 1 à 9 selon les études) sont des bandes de fréquences plus ou moins étroites (bandes d'octave ou de tiers d'octave) ;
- soit partiellement ; les valeurs partielles H, M et L sont des indices à prépondérance, respectivement de hautes, moyennes et basses fréquences ;
- soit globalement à l'aide d'une valeur résultant de la sommation logarithmique des valeurs par bandes de fréquences.

Les valeurs globales les plus utilisées sont le NRR (essentiellement en Amérique du nord) et le SNR (en Europe) et reflètent l'atténuation sur toute la largeur du spectre, le plus souvent entre 125 et 8 000 Hz. Le mode de calcul de ces deux indices est différent et conduit à un écart moyen d'environ 7 dB, dont une constante systématique de 3 dB (*cf. Annexe 2*). Ils sont exprimés par rapport au pourcentage de la population qu'ils sont sensés protéger : approximativement 98 % de la population en Amérique du nord, contre statistiquement 84 % en Europe ; ce qui explique partiellement l'écart moyen constaté.

D'une manière générale, les auteurs [54, 55] fondent leurs propres recherches sur une analyse des données existantes. La publication de leurs résultats s'accompagne le plus souvent d'un passage en revue des données recueillies et d'un exposé succinct des conclusions énoncées par leurs prédécesseurs. Ces conclusions deviennent le point de départ d'investigations complémentaires qui viennent conforter et augmenter les connaissances acquises. Berger [56] a ainsi rassemblé les résultats de 22 études indépendantes portant sur environ 40 protecteurs de divers types, menées dans sept pays, pour un total approximatif de 2 900 sujets d'essai répartis dans 90 industries différentes. Cette étude confirme les écarts entre VAL et VAS : ils sont importants, notamment pour les protecteurs de type bouchons d'oreille.

La diversité des données et des variantes de méthodes utilisées pour les obtenir est un écueil à une analyse réellement homogène des résultats. Il n'est pas possible de conclure de manière uniformisée pour tous les types de protecteurs.

L'évolution de la normalisation

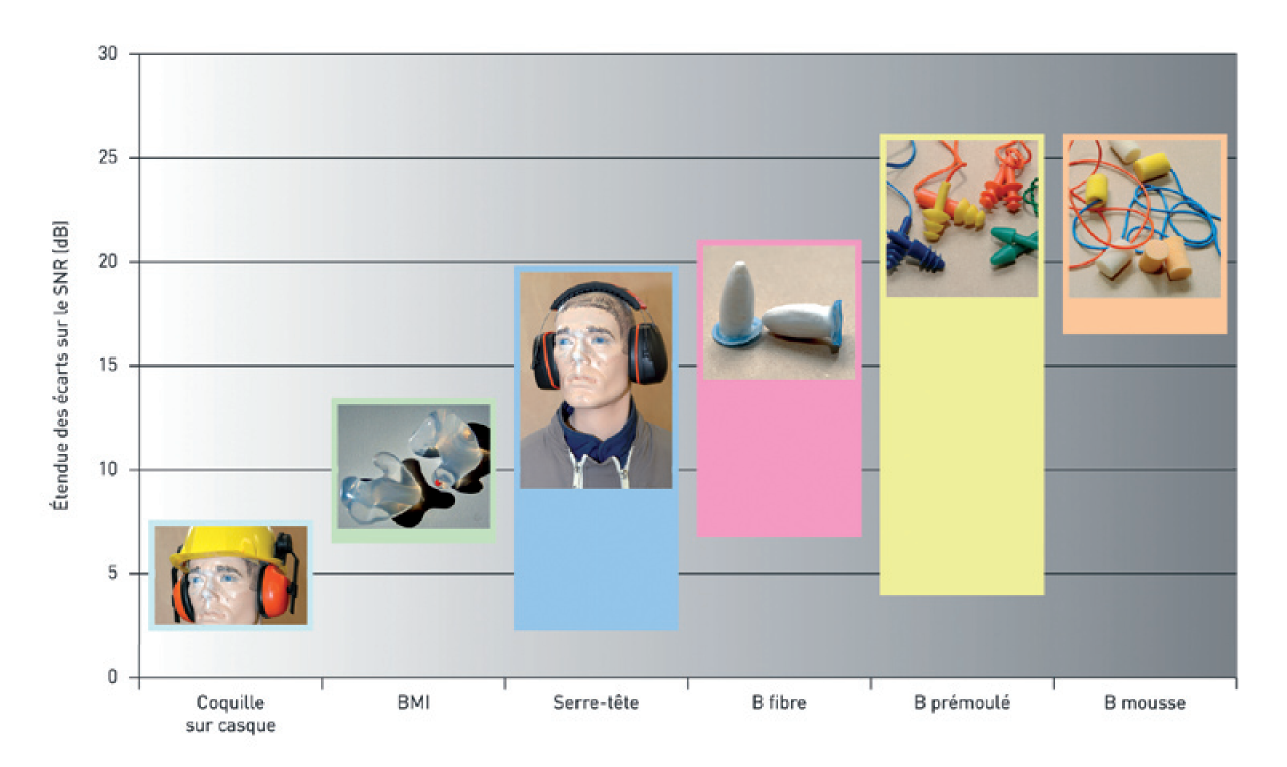
Certaines études ont permis des progrès indéniables dans le domaine de la normalisation. Les conclusions des études de Berger en 1982 et 1983 [44, 54] ne sont que les prémices d'un ensemble de travaux qui vont converger vers une modification de la normalisation américaine, puis internationale (ISO), relative aux méthodes de détermination des atténuations acoustiques des protecteurs contre le bruit.

La phase déterminante dans l'évolution de la normalisation est fondée sur une étude [17] qui s'appuie sur l'idée d'une nouvelle approche pour améliorer la représentativité des données de laboratoire et les rendre prédictives de la performance *in situ* des protecteurs. Son objectif est de simuler une utilisation « *atteignable* » (Berger utilise le néologisme « *achievable* ») du protecteur ; c'est-à-dire le bon usage qu'en ferait n'importe quel utilisateur qui ferait un effort consciencieux pour obtenir un affaiblissement efficace associé à un confort raisonnable. Il espère obtenir cet usage réussi à l'aide de la méthode de mise en place du protecteur qu'il préconise, la « *Subject-fit protocol* » ou méthode SF.

En 1993, lors du 126e congrès de l'Acoustical Society of America, Berger, Royster, Franks et Nixon, tous membres du groupe de normalisation ANSI S12/WG11, communiquent les résultats de leurs travaux relatifs à la mise en œuvre de la méthode SF dans le cadre d'une étude interlaboratoire pour trois bouchons d'oreille et un serre-tête.

FIGURE 1

Étendue des écarts entre VAL et VAS par type de PICB
Difference extent between VAL and VAS according to HPD type



En 1997, la méthode SF est intégrée à l'ANSI S12.6 [17] et prend la désignation de méthode B ; l'ancienne méthode de 1984 reste présente dans la norme sous l'appellation de méthode A.

Récemment, l'ISO a publié une transposition [57] de cette norme décrivant la méthode B sous l'appellation suivante : « *Méthode d'estimation de la réduction du bruit au moyen de réglages par des sujets d'essai non expérimentés* ».

L'ÉVOLUTION DES INDICES DE PROTECTION

Depuis les années 70, les spécialistes ont cherché à caractériser l'affaiblissement acoustique d'un protecteur par un indice global. À la base de cette recherche, les américains utilisent une méthode pratique fondée sur la confrontation du spectre d'atténuation du protecteur et des spectres de six bruits différents censés représenter l'étendue des bruits présents dans l'industrie. Les bruits sont tels que la différence de leur niveau pondéré C et de leur niveau pondéré A varie de – 1 à 18 dB. La méthode sera améliorée mais ne donnera jamais entière satisfaction.

La précision du NRR a été discutée par de nombreux auteurs. Plus tard, un chercheur australien [58] a utilisé les capacités de l'informatique pour établir des calculs statistiques sur la précision des différents indices globaux utilisés à travers le monde. Pour cela, il a utilisé des données relatives à 400 différents spectres de bruit d'exposition et les spectres d'atténuation de 70 protecteurs choisis également à travers le monde. Il conclut à l'impossibilité d'extraire un indice global de son contexte national.

La non représentativité des données initiales est indirectement évoquée dans une étude comparative menée en France [27]. Dans cette étude, l'auteur compare les valeurs d'affaiblissement acoustique déterminées à l'aide de diverses méthodes, subjectives ou objectives, et les indices globaux qui en résultent. Il met en évidence une surestimation des atténuations obtenues à l'aide de la méthode REAT.

En 1991, Park [55] constate la difficulté d'obtenir des résultats proches de la valeur d'affaiblissement *in situ* en simulant des conditions de terrain lors de mesures en laboratoire, notamment pour les bouchons d'oreille. La mise en oeuvre de telles méthodes pourrait conduire à des indices de protection tout à fait irréalistes.

Une autre étude [46] indique que le calcul du NRR, fondé sur les données d'atténuation obtenues en laboratoire, induit des imprécisions et des erreurs dans l'estimation des performances des protecteurs. Elle montre que le calcul du niveau résiduel sous le protecteur (L'_A) est directement dépendant du spectre de bruit d'exposition et notamment de l'écart entre le niveau du bruit d'exposition pondéré A et ce même bruit pondéré C.

Des résultats issus de données françaises conduisent à la même conclusion pour le calcul du SNR européen [3].

Une autre analyse, publiée plus récemment [59] propose, pour une meilleure information des utilisateurs, de remplacer l'unique NRR indiqué sur la notice d'utilisation par un indice en dB, le NRS (Noise Reduction Statistic) à deux composantes, la $NRS_{A,20}$ et la $NRS_{A,80}$; la première indiquant le niveau de protection le plus faible pouvant être obtenu par n'importe quel utilisateur non averti, la seconde précisant le niveau maximum de protection pouvant être obtenu par un utilisateur motivé et averti.



CONCLUSION

Les valeurs d'affaiblissement acoustique réelles telles qu'elles peuvent être estimées *in situ* (VAS) sont toujours inférieures aux valeurs d'affaiblissement acoustique obtenues à l'aide de mesures effectuées en laboratoire (VAL), quel que soit le type de protecteurs. Il n'est pas possible d'établir une relation universelle entre VAL et VAS. En effet, cet écart moyen varie de 5 à 21 dB selon le type de PICB (*cf. Figure 1*). Il est plus important pour les PICB de type bouchon que pour ceux de type coquille. Pour les bouchons d'oreille, les écarts différent selon le type de matériau composant le protecteur.

Dans une étude relative à l'industrie du bâtiment, il apparaît qu'environ 20 % seulement des situations de surexposition sont réglées par l'utilisation d'un protecteur individuel [24]. Dans ses conclusions l'auteur indique que les PICB ne sont pas efficaces parce que la plupart des utilisateurs ne sont pas informés quant à la technique de mise en place de leur protecteur. Le port d'un PICB ne constituerait donc pas la bonne solution pour une réelle protection des travailleurs de cette industrie. Du moins, devrait-elle s'accompagner d'efforts permanents dans l'application des programmes de conservation de l'audition. Cependant, la protection individuelle est encore très souvent le seul palliatif immédiat aux risques dus à l'exposition au bruit.

Des recherches récentes visent à mettre au point un protecteur intelligent [60] qui saurait protéger des bruits nocifs et permettrait la compréhension des signaux utiles. L'objectif est séduisant mais la mise en œuvre individuelle d'un tel protecteur est encore utopique. Les termes de la directive 2003/10/CE [1] relatifs à l'estimation des atténuations des PICB sont encore l'objet de débats. Des questions cruciales restent posées [4] quant à l'application pratique de cette directive, en particulier le respect des valeurs limites d'exposition, protecteur inclus.

Par conséquent, sachant que des solutions différentes sont proposées dans plusieurs pays de l'Union européenne, des interrogations restent en suspens et l'INRS se doit de proposer une recommandation provisoire (*cf. Encadré*). Celle-ci permettra aux préventeurs de conseiller les utilisateurs pour une protection adéquate, compte tenu du type de protecteurs employés et du niveau d'information des utilisateurs en matière de mise en place du protecteur.

Cette recommandation rappelle l'importance, et donc la nécessité, de la formation des salariés au port des protecteurs telle qu'elle est définie dans la directive 2003/10/CE [1] ; elle prend en compte, pour chaque type de PICB, d'une part, les VAL indiquées sur la notice d'utilisation du protecteur et, d'autre part, les écarts VAL/VAS mis en évidence par les résultats de la présente étude. Le calcul du niveau résiduel sous le protecteur doit être effectué avec des VAL modifiées (diminuées statistiquement) pour augmenter la marge de protection initiale en passant par exemple de 84 % de la population à 98 %. Tant que les salariés n'auront pas bénéficié d'une formation adaptée, la recommandation indique une décote supplémentaire de ce niveau de protection. La décote est alors liée aux écarts entre VAL et VAS en fonction du type de PICB utilisé.

À plus long terme, un consensus devrait être établi au sein de l'Union européenne pour harmoniser les recommandations nationales par le biais, par exemple, de la normalisation (CEN) s'appuyant sur une connaissance actualisée de l'affaiblissement réel *in situ* des PICB.

Reçu le : 27/03/2008
Accepté le : 15/05/2008

ENCADRÉ

RECOMMANDATION DE L'INRS

Celle-ci consiste à diminuer l'atténuation déclarée (APV) par le fabricant de PICB :

- d'abord en considérant l'atténuation comme étant la valeur moyenne diminuée de 2 écarts types ;
- ensuite, et seulement dans le cas où la mise en place de formations personnalisées au port du PICB n'est pas assurée, à appliquer des décotes supplémentaires selon le type de protecteur :
  - serre tête : - 5 dB(A),
  - serre tête monté sur casque : - 7 dB(A),
  - bouchon (mousse, fibre, pré-moulé, préformé) : - 10 dB(A)
  - bouchon moulé individualisé : - 5 dB(A).

L'INRS explicitera cette recommandation en publiant une fiche pratique de sécurité sur le sujet. De plus, des outils de calcul permettant une mise en œuvre simple et rapide de cette recommandation seront mis à la disposition des préventeurs d'entreprise sur le site Internet de l'INRS.

ANNEXE I

COMPTES RENDUS DE MESURES PRÉSENTANT DES DONNÉES DE LABORATOIRE, IN SITU OU PSEUDO-IN SITU.

Référence	Type de PICB (1)	Sujets d'essai	Méthode d'essai	Site d'essai	Particularité
PADILLA USA 1976 [32]	≠ B	Travailleurs, ≠ groupes de 15 à 443	REAT avec casque audiométrique, ANSI 1957	Pas de précision sur le site des mesures in situ	Uniquement à 500 Hz
EDWARDS USA 1978 [34]	3 B	Travailleurs, 168, 28 pour chacun des 6 sites	REAT avec casque audiométrique, ANSI 1957	Chambre acoustique mobile	
ROYSTER USA 1980 [12]	2 B	Travailleurs, 70	Audiométrie et comparaison de (TTS)	Cabine audiométrique	
ALBERTI Canada 1979 [25]	3 B ≠ ST	Travailleurs, 88	REAT Pas de référence normative	Cabine acoustiquement isolée, équipée d'un champ acoustique	Étude menée dans le cadre d'une requête de plaignants
ROYSTER USA 1980 [12]	2 B	Travailleurs, 70	Audiométrie et comparaison de (TTS)	Cabine audiométrique	
ABEL Canada 1982 [19]	6 B 4 ST	Travailleurs, 347	REAT Pas de référence normative	Cabine acoustiquement isolée, équipée d'un champ acoustique	Étude menée dans le cadre d'une requête de plaignants
BERGER USA 1982 [54]	1 B	65, naïfs et expérimentés			
CHUNG Canada 1983 [7]	≠ ST	Travailleurs, 101, dans 18 sites	Dosimétrie comparée	Poste de travail	Portent leur propre protecteur
EDWARDS USA 1983 [35]	6 B	Travailleurs, 280, 28 pour chacun des 10 sites	REAT avec casque audiométrique, ANSI 1974	Chambre acoustique mobile	Inclus les résultats de EDWARDS 1978
GOFF USA 1984 [8]	≠ ST	Travailleurs, 40,	Dosimétrie comparée	Poste de travail (mines)	Portent leur propre protecteur
ROYSTER USA 1984 [36]	2 B 1 ST	Travailleurs, 50	Audiométrie et comparaison de TTS	Cabine audiométrique	
BEHAR Canada 1985 [20]	4 B 1 ST 2 CC	Travailleurs, 177 par groupes de 5 à 36 sur 3 sites	REAT ANSI 1974	Cabine non isolée, équipée d'un champ acoustique	Fréquences ≥ 250 Hz
EDWARDS USA 1986 [21]	1 B	Travailleurs, 56, 28 pour chacun des 2 sites	REAT avec casque audiométrique, ANSI 1974	Chambre acoustique mobile	Avec compilation des résultats antérieurs dans 15 sites ≠
MENDEZ Argentine 1986 [31]	4 B 1 ST	Travailleurs, 60, 30 pour chacun des 2 sites	REAT, IRAM 4060	Cabine non isolée, équipée d'un champ acoustique	
SMOORENBURG Pays-Bas 1986 [48]	1 B	Sujets naïfs, 48, 96 oreilles	REAT avec casque audiométrique, ISO 4869-1	Cabine audiométrique	Les sujets sont des militaires du contingent
PEKKARINEN Finlande 1987 [9]	≠ ST	Travailleurs, 238, 21 sites	Dosimétrie comparée	Poste de travail (activités très variées)	Portent leur propre protecteur
BERGER USA 1988 [28]	2 B 1 ST	Sujets naïfs, 100	REAT, ANSI 1984	Chambre acoustique normalisée	
PFEIFFER Allemagne 1989 [22]	3 B 4 ST	Travailleurs, 177 par groupes de 10 à 69 sur 3 sites	REAT, ISO 4869-1	Chambre acoustique + Chambre acoustique mobile + Cabine audiométrique	Fréquences ≥ 500 Hz
CASALI USA 1990 [29]	2 B 1 ST 1 B+ST	Sujets naïfs, 40	REAT, ANSI 1984	Chambre acoustique normalisée	2 mises en place du PICB ≠ + Simulations de tâches
HEMPSTOCK Royaume-Uni 1990 [23]	3 B 2 ST 2 CC	Travailleurs, 262 par groupes de 20 à 72 sur 8 sites	REAT, ISO 4869-1	Chambre acoustique mobile	
CASALI USA 1991 [37]	4 PICB	Sujets naïfs, 40 Travailleurs, 40	REAT, ANSI 1984	Chambre acoustique normalisée	2 mises en place du PICB ≠ + Simulations de tâches
KOSŁOWSKI Pologne 2004 [38]	17 ST	Mannequin KEMAR + Sujets passifs	ISO 4869	Poste de travail	

(1) : B pour bouchons ; ST pour serre-tête ; CC pour coquilles montées sur casque de sécurité.



ANNEXE I (suite)

ÉTUDES À FINALITÉ NORMATIVE

Référence	Type de PICB (1)	Sujets d'essai	Méthode d'essai	Site d'essai	Particularité
MERRY USA 1992 [49]	2 B	Sujets naïfs, 10	REAT, "Subject-Fit Method"	Chambre acoustique normalisée	Étude pilote pour la méthode B
FRANKS USA 1993 [51]	3 B 1 ST	Sujets naïfs / travailleurs	REAT, "Subject-Fit Method"	Chambre acoustique normalisée + poste de travail	Comparaison Labo / in situ pour la méthode B
NIXON USA 1993 [50]	-	-	REAT, "Subject-Fit Method"	Chambre acoustique normalisée	Variabilité inter laboratoire pour la méthode B
ROYSTER USA 1996 [40]	3 B 1 ST	Sujets naïfs, 96	REAT, "Subject-Fit Method"	Chambre acoustique normalisée	Développement de la méthode B ANSI 12.6 : 1997
BERGER USA 1998 [39]	3 B 1 ST	Sujets naïfs, 96	REAT, "Subject-Fit Method"	Chambre acoustique normalisée	Validation la méthode B de ANSI 12.6 : 1997
MURPHY USA 2004 [41]	3 B 1 ST	Sujets naïfs, 96	REAT, "Subject-Fit Method"	Chambre acoustique normalisée	Nombre de sujets et reproductibilité

(1) : B pour bouchons ; ST pour serre-tête.

ÉTUDES PARTICULIÈRES

Référence	Contenu et observations
TOBIAS USA 1978 [47]	Calcul simplifié d'un indice global d'efficacité des PICB vis-à-vis d'un spectre d'exposition se voulant représentatif d'un grand nombre de situations de travail
ROYSTER USA 1979 [11]	Considérations sur les avantages/inconvénients de trois bouchons dont l'auteur compare les performances en terme de TTS (fatigue auditive temporaire)
BERGER USA 1983 [44]	Influence de la précision des données d'affaiblissement acoustique et des incertitudes de calcul de l'indice d'affaiblissement global (NRR) sur les performances réelles des PICB
WAUGH Australie 1984 [58]	Comparaison des différents indices globaux d'affaiblissement utilisés à travers le monde pour 70 PICB virtuellement utilisés dans 400 spectres d'expositions différents
LEMPERT USA 1984 [26]	Catalogue de 243 PICB testés et distribués en Amérique du nord, affichant pour chaque PICB les affaiblissements acoustiques globaux et par tiers d'octave, les écart-type, la masse, la force de l'arceau, le nom du fournisseur et les références du laboratoire ayant testé le protecteur.
LATAYE France 1987 [27]	Influence de différentes méthodes de mesures de l'affaiblissement acoustique des PICB sur la valeur des indices globaux d'affaiblissement qui leur sont associés
PARK USA 1991 [55]	Considérations sur la non représentativité des résultats de mesures issues de simulations de situations de travail en laboratoire par rapport à de réelles mesures in situ, notamment en ce qui concerne les bouchons d'oreilles
KUSY France 1991 [30]	Catalogue de 91 PICB testés et distribués en Europe, avec pour chaque PICB l'affaiblissement acoustique global et par tiers d'octave, les écarts-types, la masse, la force et la raideur de l'arceau, la pression des oreillettes, la pression d'adaptation à un relief local, des indices subjectifs du réglage et du confort et le fournisseur.
SMOORENBURG Pays-Bas 1992 [48]	Démonstration du manque de précision des mesures pseudo in situ d'affaiblissement acoustique dues à la variabilité inter et intra individuelle des sujets d'essais.
DIXON-ERNST USA 1993 [45]	Mise en évidence des conséquences légales, notamment en termes de responsabilité des employeurs, de la surestimation du NRR dans l'augmentation des pertes d'audition et de l'indemnisation des plaignants
BERGER USA 1996 [56]	Revue bibliographique rassemblant les résultats de 22 études ayant trait à l'écart VAL/VAS et menées dans 90 industries, 7 pays sur environ 2 900 sujets (tous travailleurs ou militaires)
GIARDINO USA 1996 [46]	Démonstration de la surestimation du NRR due aux incertitudes de calcul liées en particulier à la différence [L_C-L_A] du bruit d'exposition
NIOSH USA 1998 [43]	Document publié par le"National Institute for Occupational Safety and Health", organisme de prévention des maladies et accidents professionnels aux États-Unis, pour une mise à jour des connaissances et tendre vers une actualisation de la normalisation dans le domaine de la préservation de l'audition des salariés exposés au bruit. Propose une décote des affaiblissements acoustiques

ANNEXE I (suite)

ÉTUDES PARTICULIÈRES (suite)

Référence	Contenu et observations
FRANKS USA 2003 [52]	Description de trois méthodes, nouvelles selon l'auteur, aisément utilisables in situ pour déterminer les performances de tout type de protecteur sur le terrain.
LAZARUS Allemagne 2003 [4]	Considérations pessimistes sur les conséquences des dispositions nouvelles apportées par la directive 2003/10/CEE, qui semblerait poser plus de questions qu'elle n'apporterait de réponse.
GAUGER USA 2004 [59]	Mise au point de nouveaux indices globaux pour remplacer le NRR. Ces indices donnent une fourchette de valeurs et un graphique résumé d'affaiblissement acoustique, améliorant ainsi la précision des informations fournies aux utilisateurs.
LENZUNI Italie 2005 [53]	Démonstration par un modèle mathématique de la surestimation des affaiblissements acoustiques, liés à divers facteurs, conduisant à des erreurs de l'ordre de 10 dB et ayant un impact important sur la comparaison de ces affaiblissements aux valeurs limites d'exposition prescrites par la directive 2003/10/CE.
NEITZEL USA 2005 [24]	Analyse de données d'exposition au bruit et de protection de l'audition chez les ouvriers du bâtiment. La protection contre le bruit à l'aide d'équipement individuel n'est pas une solution adaptée aux contraintes de l'industrie de la construction.
VOIX Canada 2005 [60]	Vers un bouchon d'oreille "intelligent". L'objectif est de rendre le protecteur plus confortable pour qu'il soit porté sans contrainte ; confortable est utilisé au sens large, tant du point de vue dimensionnel que de celui de l'intelligibilité du résiduel perceptible.

ANNEXE II

CALCUL DU NRR

Le NRR est le résultat de l'application de l'équation suivante :

$$NRR = 107{,}9dB(C) - 10.\log \sum_{f=125}^{8000} 10^{0{,}1(L_{Af} - APV_{f98})} - 3dB$$

où L_{Af} est le niveau de pression acoustique d'une bande d'octave pondéré A à la fréquence f d'un bruit rose qui a un niveau de pression acoustique global pondéré C de 107,9 dB, et APV_{f98} est la valeur moyenne d'atténuation moins deux écarts-types à la même fréquence f.

Application numérique NRR

	Fréquence	63	125	250	500	1 000	2 000	3 000	4 000	6 000	8 000	Σ Log
1	L	-	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	-	100,0	-	100,0	
2	Pondération C	-	-0,2	0,0	0,0	0,0	-0,2	-	-0,8	-	-3	
3	L_{Cf}	-	99,8	100,0	100,0	100,0	99,8	-	99,2	-	97,0	107,9
4	Pondération A	-	-16,1	-8,6	-3,2	0,0	1,2	-	1,0	-	-1,1	
5	L_{Af}	-	83,9	91,4	96,8	100,0	101,2	-	101,0	-	98,9	
6	m_f (exemple)	-	21,0	22,0	23,0	29,0	41,0	43,0	47,0	41,0	36,0	
7		-	21,0	22,0	23,0	29,0	41,0	-	45,0*	-	38,5*	
8	sd (exemple)	-	3,7	3,3	3,8	4,7	3,3	3,3	3,4	6,1	6,5	
9	sd x 2	-	7,4	6,6	7,6	9,4	6,6	-	6,7**	-	12,6**	
10	APV_{f98} [(6) – (9)]	-	13,6	15,4	15,4	19,6	34,4	-	38,3	-	25,9	
11	L_{Af}-APV_{f98} [(5) – (10)]	-	70,3	76,0	81,4	80,4	66,8	-	62,7	-	73,0	85,1
12	**NRR_{98}**											**19,8**

* Atténuation moyenne à 3 000 et 4000 Hz et à 6000 et 8000 Hz.
** Somme des écarts-types pour 3 000 et 4 000 Hz et pour 6 000 et 8 000 Hz.

ANNEXE II (suite)

CALCUL DU SNR

Le SNR est le résultat de l'application de l'équation suivante :

$$SNR_x = 100dB(C) - 10.\log \sum_{f=63}^{8000} 10^{0,1(L_{Af} - APV_{fx})}$$

où L_{Af} est le niveau de pression acoustique d'une bande d'octave pondéré A à la fréquence f d'un bruit rose qui a un niveau de pression acoustique global pondéré C de 100 dB, APV_{fx} est la valeur moyenne d'atténuation moins un écart-type à la même fréquence f et x est le degré de la protection supposée par l'application d'un coefficient α à l'APV (α= 1 pour un degré de protection x = 84 % de la population, α = 1,64 pour x = 95 % et α = 2 pour x = 98 %).

Application numérique SNR

	Fréquence	63	125	250	500	1 000	2 000	3 000	4 000	6 000	8 000	Σ Log
1	L	91,5	91,5	91,5	91,5	91,5	91,5	-	91,5	-	91,5	100,0
2	Pondération A	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0,0	1,2	-	1,0	-	-1,1	
3	L_{Af}	65,3	75,4	82,9	88,3	91,5	92,7	-	92,5	-	90,4	98,4
4	m_f (exemple)	21,0	21,0	22,0	23,0	29,0	41,0	-	47,0	-	36,0	
5	sd (exemple)	3,7	3,7	3,3	3,8	4,7	3,3	-	3,4	-	6,5	
6	sd x 2	7,4	7,4	6,6	7,6	9,4	6,6	-	6,8	-	13,0	
7	APV_{84} [(4) – (5)]	17,3	17,3	18,7	19,2	24,3	37,7	-	43,6	-	29,5	
8	L_{Af} - APV_{84} [(3) – (6)]	48,0	58,1	64,2	69,1	67,2	55,0	-	48,9	-	60,9	72,6
6	**SNR_{84}**											**27,4**
7	APV_{98} [(4) – (6)]	13,6	13,6	15,4	15,4	19,6	34,4	-	40,2	-	23	
8	L_{Af} - APV_{98} [(3) – (7)]	51,7	61,8	67,5	72,9	71,9	58,3	-	52,3	-	67,4	76,8
9	**SNR_{98}**											**23,2**

NRR_{98} = SNR_{98}, à environ 3 dB près (3,4 dB dans le présent exemple).

ANNEXE III

ÉCARTS ENTRE VAL ET VAS EN TERME DE SNR PAR TYPE DE BOUCHON D'OREILLE (EN dB)

		VAS	VAL	Ecart
Bouchons en fibre minérale				
B fibre	Lempert 1983	8,8	21,5	12,7
Bilsom PoP	Lempert 1983	7,6	28,6	21,0
Bilsom PoP	Mendez 1986	13,6	29,7	16,1
POP	Hempstock 1990	11,2	18,0	6,8
POP	Edwards 1978	7,5	28,5	21,0
SOFT	Hempstock 1990	16,7	28,4	11,7
Moyenne		10,9	25,8	**14,9**
SD		3,7	4,8	5,6
Bouchons en mousse				
Decidamp	Lempert 1983	8,9	35,0	26,1
E-A-R ?	Lempert 1983	15,1	35,0	19,9
E-A-R	Hempstock 1990	7,2	23,8	16,6
E-A-R	Abel 1982	13,9	38,6	24,7
Moyenne		11,3	33,1	**21,8**
SD		3,8	6,4	4,4
Bouchons prémoulés				
V51R	Lempert 1983	4,3	27,5	23,2
Comfit	Abel 1982	12,2	32,8	20,6
Ear Defender II	Abel 1982	7,3	33,5	26,2
Ear Defender	Lempert 1983	0,4	23,8	23,4
Willson EP100	Abel 1982	15,1	33,1	18
B prémoulé	Mendez 1986	5,1	9,0	3,9
Moyenne		7,4	26,6	**19,2**
SD		5,4	9,5	8,0
Bouchons moulés individualisés				
BMI avec évent	Lempert 1983	7,1	20,6	**13,5**
BMI plein	Lempert 1983	11,0	17,6	**6,6**

Les valeurs en gras sont les valeurs moyennes d'écart entre VAL et VAS indiquées dans la colonne « écart moyen » du tableau IVa.



ANNEXE III (suite)

ÉCARTS ENTRE VAL ET VAS EN TERME DE SNR PAR TYPE DE SERRE-TÊTE (EN dB)

		VAS	VAL	Ecart
Coquilles montées sur casque				
Bilsom Comfort	Hempstock 1990	19,9	22,2	2,3
Hellberg 26007	Hempstock 1990	21,6	29,2	7,6
Moyenne		20,8	25,7	**5,0**
SD		1,2	4,9	3,7
Serre-tête				
Norseg	Mendez 1986	14,1	16,1	2,0
Auralg. III	Hempstock 1990	22,5	27,4	4,9
Straightaway	Abel 1982	18,3	29,4	11,1
MSA Mark IV	Abel 1982	15,6	30,1	14,5
Muff A	Goff 1984	12,7	30,0	17,3
Muff B	Goff 1984	13,3	31,1	17,8
Muff C	Goff 1984	9,6	29,2	19,6
Safir ED1SF	Hempstock 1990	17,2	21,9	4,7
Moyenne		15,4	26,9	**11,5**
SD		3,9	5,2	6,8

Les valeurs en gras sont les valeurs moyennes d'écart entre VAL et VAS indiquées dans la colonne « écart moyen » du tableau IVa.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Directive 2003/10/CE du Parlement Européen et du Conseil du 6 février 2003 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (bruit). Journal officiel des Communautés européennes du 15 février 2003 n° L 42/38-44.

[2] Norme NF EN ISO 4869-2 – Protecteurs individuels contre le bruit. Partie 2 : Estimation des niveaux de pression acoustique pondérés A en cas d'utilisation de protecteurs individuels contre le bruit. Paris - La Défense, AFNOR, août 1995, 13 p.

[3] THIERY L., KUSY A. – (2004) Difficultés méthodologiques et métrologiques liées à l'estimation d'un niveau d'exposition au bruit compte tenu du port d'un protecteur individuel contre le bruit. Document de travail. INRS/IET – NP/04. DT-054/LT.

[4] LAZARUS. H. – The New EC Noise Directive to Protect Employees at the Workplace. Applied Acoustics, 2003, vol. 64, p. 1103-1112.

[5] Norme NF EN ISO 11904-2 – Acoustique – Détermination de l'exposition sonore due à des sources sonores placées à proximité de l'oreille. Partie 2 : technique utilisant un mannequin. Paris - La Défense, AFNOR, juin 2005, 16 p.

[6] Norme NF EN ISO 11904-1 – Acoustique – Détermination de l'exposition sonore due à des sources sonores placées à proximité de l'oreille. Partie 1 : Technique du microphone placé dans une oreille réelle (technique MIRE). Paris - La Défense, AFNOR, 2002.

[7] CHUNG D. Y., HARDIE R., GANNON R. P. – The Performance of Circumaural Hearing Protectors by Dosimetry. Journal of Occupational Medicine, 1983, vol. 25, n° 9, p. 679-682.

[8] GOFF R. J., BLANK W. J. – A Field Evaluation of Muff-Type Hearing Protection Devices. Sound & Vibration, 1984, vol. 18, n° 10, p. 16-22.

[9] PEKKARINEN J. – Industrial Impulse Noise, Crest Factor and the Effect of Ear-muffs. American Industrial Hygiene Association Journal, 1987, vol. 48, n° 10, p. 861-866.

[10] Norme NF ISO 8253-1 – Acoustique - Méthodes d'essai audiométriques - Partie 1 : Audiométrie liminaire fondamentale à sons purs en conduction aérienne et en conduction osseuse. Paris - La Défense, AFNOR, mars 1993, 15 p.

[11] ROYSTER L. H. – Effectiveness of Three Different Types of Ear Protectors in Preventing Temporary Threshold Shifts. Journal of Acoustical Society of America, 1979, Suppl. 1, vol. 66, n° DD16, p. S62.

[12] ROYSTER L. H. – An Evaluation of the Effectiveness of Two Different Insert-Types of Ear Protection in Preventing Temporary Threshold Shifts in an Industrial Environment. American Industrial Hygiene Association Journal, 1980, vol. 41, n° 3, p. 161-169.

[13] Norme ISO 4869-1 – 1990(E). Acoustics – Hearing protectors – Part 1: Subjective method for the measurement of sound attenuation. Genève, International Organization for Standardization, 1990.

[14] Norme ANSI Z24.22 – 1957. American Standard Method for the Measurement of the Real-Ear Attenuation of Ear Protectors at Threshold. New York, American National Standard Institute, 1957.

[15] Norme ANSI S3.19 – 1974. Method for the Measurement of the Real-Ear Protection of Hearing Protectors and Physical Attenuation of Earmuffs. New York, American National Standard Institute, 1974.

[16] Norme ANSI S12.6 – 1984. Method for the Measurement of the Real-Ear Attenuation of Hearing Protectors. New York, American National Standard Institute, 1984.

[17] Norme ANSI S12.6 – 1997. American National Standard Methods for Measuring Real-Ear Attenuation of Hearing Protectors. New York, American National Standard Institute, 1997.

[18] Norme AS/NZS 1270 – 2002. Acoustics – Hearing protectors. Sydney, Australian/New Zealand Standard, 2002.

[19] ABEL S. M., ALBERTI P. W., RIKO K. – User Fitting of Hearing Protectors: Attenuation Results . Personal hearing protection in Industry. New York: Raven Press, 1982, p. 315-322.

[20] BEHAR A. – Field Evaluation of Hearing Protectors. Noise Control Engineering Journal, 1985, vol. 24, n° 1, p.13-18.

[21] EDWARDS R. G., GREEN W.W. – Effect of an Improved Hearing Conservation Program on Earplug Performance in the Workplace. Noise Control Engineering Journal, 1986, vol. 28, n° 2, p. 55-65.

[22] PFEIFFER B. H., KUHN H. D., SPECHT U., KNIPFER C. – Schalldämmung von Gehörschützern in der betrieblichen Praxis. Sankt-Augustin : Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit, Rapport 5/89, 1989.

[23] HEMPSTOCK T. I., HILL E. – The Attenuations of some Hearing Protectors as Use in the Workplace. Annals of Occupational Hygiene, 1990, vol. 34, n° 5, p. 453-470.

[24] NEITZEL R., SEIXAS N. – The Effectiveness of Hearing Protection Among Construction Workers. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2005, vol. 2, p. 227-238.

[25] ALBERTI P. W., RIKO K., ABEL S. M., KRISTENSEN R. – The Effectiveness of Hearing Protectors in Practice. Journal of Otolaryngology, 1979, vol. 8, n° 4, p. 354-359.

[26] LEMPERT B. L. – Compendium of Hearing Protection Devices. Sound & Vibration, 1984, vol. 18, n° 5, p. 26-39.

[27] LATAYE R., DAMONGEOT A. – Évaluation des performances acoustiques des protecteurs individuels. Influence de la méthode de mesure. Les Cahiers de Notes Documentaires, 1987, vol 129, n° 4, p. 525-533.

[28] BERGER E. H. – Can Real-World Hearing Protector Attenuation Be Estimated Using Laboratory Data. Sound & Vibration, 1988, vol. 22, n° 12, p. 26-31.

[29] CASALI J. G., PARK M-Y. – Attenuation Performance of Four Hearing Protectors under Dynamic Movement and Different User Fitting Conditions. Human Factors, 1990, vol. 32, n° 1, p. 9-25.

[30] KUSY A. – Efficacité et confort des protecteurs individuels contre le bruit. Travail & Sécurité, 1991, vol 4, n° 487, p. 215-243.

[31] MENDEZ A. M., SALAZAR E. B., BONTTI H. G. – Attenuation measurements of Hearing Protectors in Workplace, vol. 1. Toronto: 12th International Congress on Acoustics, 1986, paper B10-2.

[32] PADILLA M. – Ear Plug Performance in Industrial Field Conditions. Sound & vibration, 1976, vol. 10, n° 5, p. 33-36.

[33] LEMPERT B. L., EDWARDS R. G. Field Investigations of Noise Reduction Afforded by Insert-Type Hearing Protectors. American Industrial Hygiene Association Journal, 1983, vol. 44, n° 12, p. 894-902.



[34] EDWARDS R. G., HAUSER W. P., MOISEEV N. A., BRODERSON A. B., GREEN W.W. – Effectiveness of Earplugs as Worn in the Workplace. Sound & Vibration, 1978, vol. 12, n° 1, p. 12-42.

[35] EDWARDS R. G., BRODERSON A B., GREEN W.W., LEMPERT B. L. – A Second Study of the Effectiveness of Earplugs as Worn in the Workplace. Noise Control Engineering Journal, 1983, vol. 20, n° 1, p. 6-15.

[36] ROYSTER L. H., ROYSTER J. D., CECICH T. F. – An Evaluation of the Effectiveness of Three Hearing Protection Devices at an Industrial Facility with a Time Weighted Average of 107 dB. Journal of Acoustical Society of America, 1984, vol. 76, n° 2, p. 485-497.

[37] CASALI J. G., PARK M.-Y. – Laboratory versus Field Attenuation of Selected Hearing Protectors. Sound & Vibration, 1991, vol. 25, n° 10, p. 26-38.

[38] KOZLOWSKI E., KOTARBIÑSKA E., LIPOWCZAN A. – Real world efficiency of ear-muffs: measurements at noisy work-stands. Prague: 33th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, 2004.

[39] BERGER E. H., FRANKS J. R., BEHAR A., CASALI J. G., DIXON-ERNST C., KIEPER R. W., MERRY C. J., MOZO B. T., NIXON C. W., OHLIN D., ROYSTER J. D., ROYSTER L. H. – Development of a New Standard Laboratory Protocol for Estimating the Field Attenuation of Hearing Protection Devices. Part III. The Validity of Using Subject Fit Data. Journal of Acoustical Society of America, 1998, vol. 103, n° 2, p. 665-672.

[40] ROYSTER J. D., BERGER E. H., MERRY C.J., NIXON C. W., FRANKS J. R., BEHAR A., CASALI J. G., DIXON-ERNST C., KIEPER R. W., MOZO B. T., OHLIN D., ROYSTER L. H. – Development of a New Standard Laboratory Protocol for Estimation of the Field Attenuation of Hearing Protection Devices: Part I: research of ANSI S12WG11. Journal of Acoustical Society of America, 1996, vol. 99, n° 3, p. 1506-1526.

[41] MURPHY W. J., FRANKS J. R., BERGER E. H., BEHAR A., CASALI J. G., DIXON-ERNST C., KRIEG E. F., MOZO B. T., ROYSTER J. D., ROYSTER L. H., SIMON S. D., STEPHENSON C. – Development of a New Standard Laboratory Protocol for Estimation of the Field Attenuation of Hearing Protection Devices: Sample Size Necessary to Provide Acceptable Reproducibility. Journal of Acoustical Society of America, 2004, vol. 115, n° 1, p. 311-323.

[42] POULSEN T. – Nordic Round Robin Test on Hearing Protector Measurements; Subjective Results. Lyngby: Technical University of Denmark, Report n° 21, 1984.

[43] NATIONAL INSTITUTE for OCCUPATIONAL SAFETY and HEALTH – Criteria for a Recommended Standard: Occupational Noise Exposure, Revised Criteria. Cincinnati: U.S. Dept. of Health and Human Services Publication, 1998.

[44] BERGER E. H. – Using the NRR to Estimate the Real-World Performance of Hearing Protectors. Sound & Vibration, 1983, vol. 17, n° 1, p. 12-18.

[45] DIXON-ERNST C., BEHAR A. – Why Users Need Accurate Real-World Estimates of Hearing Protector's Ratings. Journal of Acoustical Society of America, 1993, vol. 94, n° 3, p. 1791.

[46] GIARDINO D. A., DURKT G. Jr. – Evaluation of Muff-Type Hearing Protectors as Used in a Working Environment. American Industrial Hygiene Association Journal, 1996, vol. 57, p. 264-271.

[47] TOBIAS J. V., Johnson D. L. – The Typical Noise: First Step in the Development of a Short Procedure for Estimating Performance of Hearing Protectors. Journal of Acoustical Society of America, 1978, vol. 63, n° 1, p. 207-210.

[48] SMOORENBURG G. F., TEN RAA B. H., MIMPEN A. M. – Real-World Attenuation of Hearing Protectors, vol. 1. Toronto: 12th International Congress on Acoustics, 1986, paper B9-6.

[49] MERRY C.J., SIZEMORE C. W., FRANKS J. R. – The Effect of Fitting Procedure on Hearing Protector Attenuation. Ear & Hearing Journal, 1992, vol. 13, n° 1, p. 11-19.

[50] NIXON C. W. – Comparison of WG11 Study Variability to That of Other Interlaboratory Studies. Journal of Acoustical Society of America, 1993, vol. 94, n° 3, p. 1792.

[51] FRANKS J. R., CASALI J. G. – Hearing Protector Attenuation from Subject-Fit Methods at the Work Site and in the Laboratory. Journal of Acoustical Society of America, 1993, vol. 94, n° 3, p. 1791-1792.

[52] FRANKS J. R., MURPHY W. J., HARRIS D. A., JOHNSON J. L., SHAW P. B. – Alternative Field Methods for Measuring Hearing Protector Performance. American Industrial Hygiene Association Journal, 2003, vol. 64, n° 4, p. 501-509.

[53] LENZUNI P. – Predicting the Real World Performance of Hearing Protectors. Managing Uncertainty in Noise Measurement and Prediction. Symposium, Le Mans, 2005.

[54] BERGER E. H. – Laboratory Estimates of the Real World Performance of Hearing Protectors. Personal hearing protection in Industry. New York: Raven Press, 1982, p. 299-313.

[55] PARK M-Y., CASALI J. G. – A Controlled Investigation of In-Field Attenuation Performance of Selected Insert, Earmuff, and Canal Cap Hearing Protectors. Human Factors, 1991, vol. 33, n° 6, p. 693-714.

[56] BERGER E. H., FRANKS J. R., LINDGREN F. – International Review of Field Studies of Hearing Protector Attenuation. Scientific Basis of Noise-Induced Hearing Loss. New York: Thieme Medical Pub., Inc. 1996, p. 361-377.

[57] Norme ISO/TS 4869-5 – 2006. Acoustics – Hearing Protectors – Part 5: Method for estimation of noise reduction using fitting by inexperienced test subjects.

[58] WAUGH R. – Simplified Hearing Protector Ratings - An International Comparison. Journal of Sound and Vibration, 1984, vol. 93, n° 2, p. 289-305.

[59] GAUGER D., BERGER E. H. – A New Hearing Protector Rating: The Noise Reduction Statistic for Use with A Weighting, E-A-R report n° 04-01/HP, 2004.

[60] VOIX J., LAVILLE F. – Problématiques associées au développement d'un bouchon d'oreille « intelligent ». Pistes, 2005, vol. 7, n° 2. *http://www.pistes.uqam.ca*